

ZERSTÖRUNGSFREIE ÜBERWACHUNG MIKROSTRUKTURELLER VERÄNDERUNGEN EINES BAUTEILS
(SCHICHTSYSTEM, TURBINENSCHAUFELN, BRENNKAMMER AUSKLEIDUNG) MIT SPEZIELLEN,
EINFACHEN MESSMETHODEN

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erfassung von mikrostrukturellen Veränderungen eines Bauteils gemäß Anspruch 1.

10 Bauteile, die mechanischen und/oder thermischen Belastungen ausgesetzt sind, zeigen eine Degradation ihrer mechanischen, chemischen oder thermischen Eigenschaften, weil sich ihre Mikrostruktur aufgrund der Belastungen verändert. Bauteile in Turbinen wie z.B. Gas- oder Dampfturbinen, sind sowohl mechanischen als auch thermischen Belastungen ausgesetzt.

15 Insbesondere in der Brennkammer oder in der ersten Stufe der Turbine sind solche Bauteile als Schichtsystem ausgelegt. Dabei sind auf einem Substrat, also einer Tragstruktur, eine oder mehrere Zwischenschichten vorhanden, die das Bauteil vor Oxidation/Korrosion sowie zu hohem Wärmeeintrag schützt.

20

Zur Wärmedämmung wird eine keramische Schicht verwendet.

Die US 6,200,088 und die US 6,455,173 offenbaren, dass Bauteile im Betrieb überwacht werden.

25

Die US 6,544,665 offenbart die Versinterung einer Wärmedämmschicht.

30 Die US 6,553,318 B2 offenbart ein Verfahren zur schnellen und gleichzeitigen Messung von Eigenschaften von vielen Proben.

Die US 6,577,141 B2 offenbart ein kapazitives Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Asphalt.

35 Die US 6,512,379 B2 offenbart eine Vorrichtung zur Überwachung des Zustands einer Wärmedämmschicht, wobei

Elektrizität innerhalb der Wärmedämmschicht, wie zum Beispiel durch einen Piezo-Effekt, intrinsisch erzeugt wird.

Die US 4,408,294 A offenbart eine Methode zur Detektion von
5 Rissen, die aufgrund von Vibrationen entstehen.

Die EP 0 773 359 A1 offenbart eine Vorrichtung um Schäden in keramischen Teilen zu überwachen, bei denen zusätzlich elektrische Leiterbahnen eingebracht werden, die als
10 Detektoren verwendet werden.

Die WO 02/079774 A2 offenbart ein Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung bei dem eine Wirbelstrommessmethode verwendet wird.

15

Die US 5,552,711 A offenbart ein Überwachungssystem, bei dem elektromagnetische Signale von Ionen erfasst werden, wobei diese Ionen von verschlissenen Bauteilen stammen.

20 Die US 5,588,034 A offenbart eine Vorrichtung, ein Verfahren zur Überprüfung eines Kristalls mittels Röntgenstrahlen.

Die DE 24 42 639 A-OS offenbart ein Verfahren zur Überwachung des Erosionszustandes von Gasturbinenschaufeln, bei dem ein
25 Leitungswiderstand eines Vergleichskörpers zur Bestimmung des Erosionszustandes benutzt wird.

Die US 6,517,236 B2 offenbart ein Verfahren zur Thermografie.

30

Bisher musste die Mikrostruktur einiger Bauteile einer aus vielen Bauteilen bestehenden Vorrichtung zerstörend untersucht werden, um entscheiden zu können, ob die anderen, restlichen Bauteile weiter im Einsatz bleiben können.

35

Es ist daher Aufgabe der Erfindung dieses Problem zu überwinden.

Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur Erfassung der mikrostrukturellen Veränderungen eines Bauteils gemäß Anspruch 1, indem Materialparameter des Bauteils zumindest zweimal, insbesondere mehrmals mittels geeigneter
5 Messmethoden bestimmt werden.

In den Unteransprüchen sind weitere vorteilhafte Maßnahmen und Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens aufgelistet. Die in den Unteransprüchen aufgelisteten Maßnahmen können in
10 vorteilhafter Art und Weise miteinander kombiniert werden.

Bei den erfindungsgemäß verwendeten Messmethoden muss von außen in das Material Energie in Form von elektrischer Spannung, Wärme oder mechanische Energie eingebracht werden,
15 um ein Messsignal zu erhalten. Dies steht im Gegensatz zu der US 6,512,379, bei der innerhalb der Wärmedämmschicht Elektrizität ohne äußeres Einwirken entsteht.

Im Gegensatz zu der EP 0 773 359 A1 werden keine zusätzlichen
20 Maßnahmen getroffen, beispielsweise in Form von Leiterbahnen, um eine Messmethode durchführen zu können.

Eine Thermografie-Prüfung ist bei den Bauteilen, die in dieser Anmeldung beschrieben werden, gemäß der US 6,517,236
25 B2 nicht möglich, da die Bauteile nicht von einer Rückseite erwärmt werden können.

30 Es zeigen:
Figur 1 ein Schichtsystem,
Figur 2 mikrostrukturelle Veränderungen einer Schicht oder eines Substrats eines Schichtsystems,
Figur 3 Degradation eines beschichteten Substrats durch Oxidation,
Figur 4 mikrostrukturelle Veränderungen eines

	Substrats eines Schichtsystems,
Figur 5,	Verschiedene beispielhafte Messanordnungen
6, 7, 8, 9, 10,	zur Bestimmung von Materialparametern
11, 12, 13, 14, 15	eines Schichtsystems,
Figur 16	einen zeitlichen Verlauf von
	Materialparametern,
Figur 17	eine Dampfturbine,
Figur 18	eine Gasturbine,
Figur 19	eine Turbinenschaufel und
Figur 20	eine Brennkammer.

Die Figur 1 zeigt beispielhaft ein Bauteil 1, das als Schichtsystem 1 ausgebildet ist.

Das Schichtsystem 1 besteht aus einem Substrat 4, auf dem
5 zumindest eine Schicht 7 aufgebracht ist.
Auf dieser Schicht 7, die dann eine Zwischenschicht
darstellt, ist beispielsweise eine weitere äußere Schicht 10
aufgebracht.

- 10 Das Substrat 4 kann metallisch oder keramisch sein.
Insbesondere bei Bauteilen für Strömungsmaschinen
(Flugtriebwerke, Turbinen zur Elektrizitätserzeugung,
Kompressoren, wie z.B. Gas- 100 (Fig. 18) oder Dampfturbinen
300, 303 (Fig. 17)), wie z.B. Turbinenschaufeln 120, 130
15 (Fig. 19), Gehäuseteilen oder Brennkammerauskleidungen 155
(Fig. 20) ist das Substrat 4 metallisch und besteht
vorzugsweise aus einer eisen-, kobalt- oder nickelbasierten
Superlegierung.
- 20 Auf dem Substrat 4 kann eine Anbindungsschicht, insbesondere
eine metallische Schicht 7, beispielsweise eine MCrAlX-
Schicht vorhanden sein, wobei M für zumindest ein Element der
Gruppe Eisen, Kobalt oder Nickel steht, sowie X für Yttrium,
Silizium und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden
25 (Aktivelemente).

Die äußere Schicht 10 kann wiederum metallisch oder keramisch sein.

Im Falle von Turbinenbauteilen 120, 130, 155 ist die äußere Schicht 10 häufig eine keramische Wärmedämmschicht.

5

Weitere Aufbauarten eines Schichtsystems 1 sind denkbar.

Beispielsweise kann eine keramische Schicht direkt auf dem Substrat 4 aufgebracht sein. Insbesondere braucht für

10 Bauteile, die an nicht zu heißen Stellen einer Turbine 100, 300, 303 eingesetzt werden, keine keramische Wärmedämmschicht 10 vorgesehen zu werden, so dass dann die Schicht 7 bereits die äußere Schicht darstellt.

15 Das erfindungsgemäße Verfahren ist ebenso anzuwenden bei einem Bauteil 1, das nur aus einem Substrat 4 besteht.

Mikrostrukturelle Veränderungen ergeben sich unter anderem durch

- 20 a) Risse,
- b) Poren,
- c) Phasenänderungen (Gitterstruktur),
- d) Änderung der chemischen Zusammensetzung,
- e) Veränderung der Ausscheidungen,
- f) Spannungen (Eigenspannungen).

25

Figur 2 zeigt eine beispielhafte mikrostrukturelle Veränderung eines Substrats 4 und/oder einer Schicht 7, 10 eines Schichtsystems 1.

30

Die hier beispielhaft erwähnte keramische Wärmedämmschicht 10 soll ein gutes Thermoschockverhalten aufweisen, das insbesondere durch eine gewisse Porosität erreicht wird.

35 Daher sind in der Schicht 10 Poren 13 vorhanden, die eine gewisse Größe haben (Fig. 2, links): Aufgrund des betrieblichen Einsatzes der Schicht 10 beispielsweise in der Turbine 100, 300, 303 erfährt die Wärmedämmschicht 10 einen

Wärmeeintrag und/oder mechanische Spannungen σ . Durch den Einfluss der Temperatur T und/oder mechanische Spannungen σ versintert die poröse Wärmedämmschicht 10, so dass aus den großen Poren 13 kleinere Poren 16 werden (Fig. 2, rechts).

5 Durch die Verkleinerung der Poren 13 reduziert sich die Porosität, wodurch sich das Thermoschockverhalten der keramischen Wärmedämmschicht 10 verschlechtert.

Die mikrostrukturelle Veränderung, hier die Porosität, verursacht also eine Verschlechterung des

10 Thermoschockverhaltens.

Figur 3 zeigt die mikrostrukturellen Veränderungen einer metallischen Schutzschicht 7 auf einem Substrat 4.

Auf einer Schutzschicht 7, die als Oxidations- oder

15 Korrosionsschutzschicht dient, bildet sich beispielsweise im Fall der MCrAlX-Schichten (Fig. 18) eine Aluminiumoxidschicht 19 oder allgemeiner: eine Oxid- oder Korrosionsschicht 19. Je nach verwendeter Legierung kommt es also zu einer Verarmung eines Elements einer Legierung der Schicht 7 oder des

20 Substrats 4, das ein Oxid- oder Korrosionsprodukt bildet. Bei der MCrAlX-Schicht 7 kommt es zur Verarmung von Aluminium in der MCrAlX-Schicht 7 unterhalb der Schicht 19.

Ebenso kann es sich bei der Schicht 7 um einen alitierten

25 oder chromierten Bereich des Substrats 4 handeln.

Dabei wurde Aluminium und/oder Chrom auf das Substrat 4 aufgebracht und eindiffundiert gelassen.

Das Substrat 4 ist dann mit Aluminium oder Chrom angereichert. Auch hier kommt es durch Bildung von

30 Aluminiumoxid oder Chromoxid aufgrund von Oxidation oder Korrosion zur Verarmung an Aluminium oder Chrom.

Figur 4 zeigt eine weitere mikrostrukturelle Veränderung eines Schichtsystems, insbesondere des Substrats 4.

Ein solches Substrat 4, insbesondere aus einer
5 Superlegierung, weist Ausscheidungen 22 (γ' -Phase) auf, die die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflussen (Fig. 4, links).

Aufgrund der Temperatur T und/oder Spannungen σ verändern
10 sich die Ausscheidungen 22 so, dass der positive Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zumindest deutlich reduziert wird. Dies geschieht durch Vergrößerung der Ausscheidungen 25 (Fig. 4, rechts).

15 Ebenfalls können Risse im Substrat 4 und/oder in den Schichten 7, 10 vorhanden sein, die die Porosität erhöhen.

Da es keinen direkten, einzigen Parameter für die Mikrostruktur (Risse, Poren, Ausscheidungen, usw.) gibt, wird
20 die Mikrostruktur indirekt über einen oder mehrere Materialparameter integral bestimmt, die von Rissen, Poren und Ausscheidungen usw. beeinflusst werden. Die Messungen sind beispielsweise zerstörungsfreie Messungen.

25 Figur 5 zeigt eine beispielhafte Messanordnung, um einen Materialparameter des Substrats 4 und/oder der Schicht 7, 10 zu bestimmen.

Dabei werden an geeigneten Stellen des Substrats 4 oder der
30 Schicht 7, 10 Elektroden 28 angelegt. Mittels eines Messgeräts 31 kann die elektrische Kapazität C[F] bestimmt werden.

Die Kapazitätsmessung eignet sich am besten, wenn das
35 Substrat 4 oder die Schicht 7, 10 aus Keramik besteht, also eine hohe Dielektrizitätskonstante ϵ aufweist und eine Verringerung der Porosität erwartet wird.

Die Materialparameter des Substrats 4 können gemessen werden,
wenn die aufliegenden Schichten entfernt wurden (Fig. 6),
aber auch, wenn die aufliegenden Schichten 7 noch vorhanden
5 sind (Fig. 7).

Statt der Kapazität können auch andere elektrische
Eigenschaften, die ferroelektrischen Eigenschaften und die
pyroelektrischen Eigenschaften, insbesondere einer Keramik,
10 bestimmt werden.

Figur 8 zeigt eine weitere beispielhafte Messanordnung, um
einen Materialparameter einer Schicht 7, 10 zu bestimmen.

15 Beispielsweise durch die Verarmung des Aluminiumgehalts in
der Schicht 7 (Fig. 3) verändert sich die elektrische
Leitfähigkeit σ , die beispielsweise mittels einer 4-Punkt-
Methode ermittelt werden kann.

20 Weitere Materialparameter, die gemessen werden können, um die
chemische Änderung der Mikrostruktur zu erfahren, stellt hier
die thermische Leitfähigkeit oder magnetische Eigenschaften
dar.

25 Bei der 4-Punkt-Methode wird ein konstanter Strom I
(Gleichstrom) an zwei Stellen der Schicht 7 oder des
Substrats 4 angelegt. Der Spannungsabfall U wird an zwei
zwischen den Stromkontaktierungspunkten liegenden Stellen
abgegriffen. Daraus wird ein Widerstandswert $R = \frac{U}{I}$

30 ermittelt ($\sigma \sim 1/R$).

Die elektrische Leitfähigkeit kann auch mittels induktiven
Widerstands (Wechselstrom) bestimmt werden.

Eine Veränderung im Gefüge kann mittels elektrischer und/oder
35 elektromagnetischer Materialwerte ermittelt werden. Dies sind
wiederum die elektrische Leitfähigkeit, ein induktiver

Widerstand und/oder magnetische Eigenschaften wie die Suszeptibilität.

- 5 Figur 9 zeigt eine weitere Möglichkeit um ein Materialparameter der keramischen Wärmedämmschicht 10 zu bestimmen.

10 In diesem Fall wird die thermische Leitfähigkeit λ der Schicht 10 bestimmt. Dies erfolgt durch ein Laserflash-Verfahren oder durch eine Thermowellenanalyse.

Bei dem Laserflash-Verfahren wird ein kurzzeitiger Wärmeeintrag E auf der äußeren Seite 11 der Schicht 10
15 eingebracht. Die thermische Leitfähigkeit λ der Wärmedämmschicht 10 wird dadurch bestimmt, dass die so eingebrachte Wärme E sich nach einiger Zeit über die gesamte Probe verteilt und zur Erwärmung der Probenrückseite sowie der Zwischenschicht 7 des Substrats 4 führt. Durch den
20 zeitlichen Verlauf wird die Temperaturleitfähigkeit λ bestimmt. Die Erwärmung wird mit einem Infrarot-Detektor D oder einem Pyrometer D gemessen.

Vorab kann die Schichtdicke der Schicht 10 bestimmt werden
25 (Wirbelstromverfahren), da sich im Einsatz die Schichtdicke der Schicht 10 durch Erosion verändern kann. Die gegebenenfalls verminderte Schichtdicke wird in die Berechnung der thermischen Leitfähigkeit mit einbezogen.

30 Durch die Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Zwischenschutzschicht 7 wird auch der zeitliche Verlauf der Erwärmung verändert, da sich in diesem Fall auch die thermische Leitfähigkeit der Zwischenschutzschicht 7 verändert hat.

35

Bei der Thermowellenanalyse wird die zu untersuchende Probe mit einem intensitätsmodulierten Lichtstrahl, in der Regel

einem Laserstrahl beaufschlagt. Durch die Absorption dieser Strahlung mit der Intensität I in der Probenoberfläche erzeugt die in Wärme dissipierende Energie des elektromagnetischen Feldes ein zeitlich abhängiges
5 Temperaturfeld T , welches aus einem zeitlich konstanten Temperaturfeld und einem zeitlich modulierten Temperaturfeld besteht. Dieser zeitlich veränderliche Temperaturfeldanteil wird als thermische Welle bezeichnet. Charakteristisch für die thermische Welle ist die Modulationsfrequenz W und ihre
10 Phasenverschiebung F , mit der die thermische Welle ihrer Anregung folgt. Sie ergibt sich als Lösung der inhomogenen Wärmeleitungsgleichung.

Die Ausbreitung dieser gedämpften thermischen Welle ist von
15 den zu messenden Probeneigenschaften abhängig, wie z.B. thermische Wärmeleitfähigkeit.

Durch Vergleichsmessungen an einem Schichtverbund aus Wärmedämmschicht 10 und Zwischenschuttschicht 7 kann eine
20 Veränderung der Mikrostrukturen beider Schichten 7, 10 erfasst werden.

Auch die spezifische Wärmekapazität kann als Materialparameter bestimmt werden.
25

Ebenso kann der Peltier-Effekt ausgenutzt werden, um die Materialveränderungen zu erfassen. Beim Peltier-Effekt fließt ein elektrischer Strom I durch die metallische Schicht 7 und
30 das metallische Substrat 4, wodurch ein Temperaturunterschied ΔT zwischen Substrat 4 und Schicht 7 erzeugt wird (Fig. 10). Der Temperaturunterschied ΔT ist abhängig von den Materialien des Substrats 4 und der Schicht 7. Ebenso kann die Umkehrung, der Seebeck-Effekt, ausgenutzt
35 werden (Fig. 11).

Hier wird durch einen Temperaturunterschied $\Delta T = T_1 - T_2$ eine elektrische Spannung U erzeugt. Der Temperaturunterschied ΔT

ist während des Betriebs von Substrat 4 und Schicht 7 vorhanden und kann gemessen werden.

- 5 Figuren 12, 13 zeigen weitere Anordnungen, um Materialparameter zu bestimmen.
An das Substrat 4 (Fig. 12) und/oder an die Schicht 7, 10 (Fig. 13) wird eine Ultraschallsonde 34 angelegt, um die Schallgeschwindigkeit in dem Material zu bestimmen. Die
10 Schallgeschwindigkeit hängt vom mechanischen E-Modul und der Dichte ab.
Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in dem Substrat 4 kann mit oder ohne aufliegende Schichten 7, 10 durchgeführt werden.
- 15 Ebenso kann die Schallgeschwindigkeit in den Schichten 7, 10, die auf dem Substrat 4 aufliegen, bestimmt werden.
Ebenso kann die Schallgeschwindigkeit durch die Schichten 7, 10 und das Substrat 4 hindurch gemessen werden.
Da die Schallgeschwindigkeit vom E-Modul und der Dichte
20 abhängt, wird die Schallgeschwindigkeit durch eine Veränderung der Porosität, Entstehung von Rissen, Phasenveränderung und/oder Ausscheidungen bestimmt.
- 25 Figur 14 zeigt eine weitere Anordnung um einen Materialparameter zu bestimmen.
Hier wird mittels eines Mikroindenters die Eindringtiefe in das Substrat 4 (Fig. 14) oder die Schichten 7, 10 (Fig. 15) bestimmt.
- 30 Dabei wird mit einer bestimmten vorgegebenen Kraft F der Mikroindenter für eine bestimmte Zeit auf die Oberfläche des Substrats 4 oder der Schicht 7, 10 einwirken gelassen. Die Größe des Eindrucks hängt vom E-Modul des Materials des Substrats 4 oder der Schicht 7, 10 ab.
- 35 Der E-Modul ist wiederum bestimmt durch eine veränderte Porosität und/oder Veränderung von Ausscheidungen.

Figur 16 zeigt einen beispielhaften zeitlichen Verlauf mehrerer Materialparameter, die in verschiedenen zeitlichen Abständen gemessen werden.

- 5 Ein Materialparameter kann mit der Zeit kontinuierlich oder diskontinuierlich abfallen (Fig. 16: X) oder zunehmen (Fig. 16:), weil der Materialparameter verglichen mit dem Anfangszustand zu- oder abgenommen hat.
- 10 Der Anfangswert bei $t = 0$ vor der ersten Benutzung ist auf 100% normiert, wobei $t = 0$ dem Beginn des ersten Einsatzes gleichgesetzt wird, wenn die Messung beispielsweise vor dem Einbau des Bauteils 1 erfolgte.
- Alle folgenden Werte des oder der Materialparameter des
- 15 Bauteils 1, nachdem es im Einsatz war, werden im zeitlichen Abstand mit dem Anfangswert verglichen.
- Statt einem Parameter können auch zwei oder mehr Parameter bestimmt werden, die beispielsweise als Produkt oder
- 20 Quotient, also z.B. Kapazität mal thermische Leitfähigkeit λ (Fig. 16, $C \cdot \lambda$) oder elektrische Leitfähigkeit mal thermische Leitfähigkeit (Fig. 16, $\sigma \cdot \lambda$) aufgetragen werden.
- Die Produktbildung eignet sich, wenn die Materialparameter sich in ähnlicher Weise mit der Zeit entwickeln, also entweder zu- oder abnehmen. Bei gegenläufiger zeitlicher
- 25 Entwicklung ist die Quotientenbildung sinnvoll.
- Ähnliche Verläufe wie in Figur 16 dargestellt ergeben sich auch für den zeitlichen Verlauf eines einzelnen Parameters.
- Anhand von vorher ermittelten Kalibrierungskurven kann anhand
- 30 der Änderung des Materialparameters eine mikrostrukturelle Veränderung in Abhängigkeit von der Zeit erfasst werden.

- Mittels Vergleichsproben oder mittels neu hergestellter Bauteile, die eine noch nicht degradierte Mikrostruktur
- 35 aufweisen, und Vergleichsproben oder Bauteilen, die im Einsatz waren und eine degradierte Mikrostruktur darstellen, bei denen ein Austausch oder eine Erneuerung des Bauteils

angebracht ist, wird ein Zeitpunkt festgelegt, wann ein reales Bauteil überprüft oder wiederaufgearbeitet werden soll oder das Ende seiner Lebenszeitdauer erreicht hat. Die Vergleichsproben können auch reale Bauteile 1 sein.

5

Die zumindest zweite oder folgende Messungen erfolgen im zeitlichen Abstand von der ersten Messung nach oder während des ersten Betriebseinsatzes. Die Messung der Materialparameter kann online und automatisiert erfolgen. So kann jeder Zeit der mikrostrukturelle Zustand der Bauteile 1 kontrolliert werden.

10

Ab einem bestimmten Prozentsatz der Veränderung, d.h. nach einer bestimmten Zeitdauer nach $t = 0$ kann festgelegt werden, ab wann ein Bauteil 1 wieder aufgearbeitet werden sollte oder ein kompletter Austausch erfolgen muss. So ist es z. B. sinnvoll, eine Wartung vorzusehen, wenn erkennbar ist, dass eine Wiederaufarbeitung von Bauteilen 1 noch möglich ist, aber eine Hinausschiebung der Wartung eine Wiederaufarbeitung weniger rentabel erscheinen lässt.

15

20

Die Messung der Materialparameter kann während des Einsatzes des Bauteils 1 erfolgen.

Wenn dies nicht möglich ist, kann die Messung auch erfolgen, wenn das Bauteil 1, beispielsweise eine Turbinenschaufel 120, 130, noch in einer nicht im Betrieb befindlichen Vorrichtung, beispielsweise einer Turbine 100, 300, 303 eingebaut ist.

25

30

In Figur 17 ist beispielhaft eine Dampfturbine 300, 303 mit einer sich entlang einer Rotationsachse 306 erstreckenden Turbinenwelle 309 dargestellt.

Die Dampfturbine weist eine Hochdruck-Teilturbine 300 und eine Mitteldruck-Teilturbine 303 mit jeweils einem Innengehäuse 312 und einem dieses umschließendes Außengehäuse 315 auf. Die Hochdruck-Teilturbine 300 ist beispielsweise in

35

Topfbauart ausgeführt. Die Mitteldruck-Teilturbine 303 ist zweiflutig ausgeführt. Es ist ebenfalls möglich, dass die Mitteldruck-Teilturbine 303 einflutig ausgeführt ist. Entlang der Rotationsachse 306 ist zwischen der Hochdruck-Teilturbine 300 und der Mitteldruck-Teilturbine 303 ein Lager 318 angeordnet, wobei die Turbinenwelle 309 in dem Lager 318 einen Lagerbereich 321 aufweist. Die Turbinenwelle 309 ist auf einem weiteren Lager 324 neben der Hochdruck-Teilturbine 300 aufgelagert. Im Bereich dieses Lagers 324 weist die Hochdruck-Teilturbine 300 eine Wellendichtung 345 auf. Die Turbinenwelle 309 ist gegenüber dem Außengehäuse 315 der Mitteldruck-Teilturbine 303 durch zwei weitere Wellendichtungen 345 abgedichtet. Zwischen einem Hochdruck-Dampfeinströmbereich 348 und einem Dampfaustrittsbereich 351 weist die Turbinenwelle 309 in der Hochdruck-Teilturbine 300 die Hochdruck-Laufbeschaufelung 354, 357 auf. Diese Hochdruck-Laufbeschaufelung 354, 357 stellt mit den zugehörigen, nicht näher dargestellten Laufschaufeln einen ersten Beschaufelungsbereich 360 dar. Die Mitteldruck-Teilturbine 303 weist einen zentralen Dampfeinströmbereich 333 auf. Dem Dampfeinströmbereich 333 zugeordnet weist die Turbinenwelle 309 eine radialsymmetrische Wellenabschirmung 363, eine Abdeckplatte, einerseits zur Teilung des Dampfstromes in die beiden Fluten der Mitteldruck-Teilturbine 303 sowie zur Verhinderung eines direkten Kontaktes des heißen Dampfes mit der Turbinenwelle 309 auf. Die Turbinenwelle 309 weist in der Mitteldruck-Teilturbine 303 einen zweiten Beschaufelungsbereich 366 mit den Mitteldruck-Laufschaufeln 354, 342 auf. Der durch den zweiten Beschaufelungsbereich 366 strömende heiße Dampf strömt aus der Mitteldruck-Teilturbine 303 aus einem Abströmstutzen 369 zu einer strömungstechnisch nachgeschalteten, nicht dargestellten Niederdruck-Teilturbine.

Die Turbinenwelle 309 ist aus zwei Teilturbinenwellen 309a und 309b zusammengesetzt, die im Bereich des Lagers 318 fest miteinander verbunden sind.

Die Figur 18 zeigt beispielhaft eine Gasturbine 100 in einem Längsteilschnitt.

Die Gasturbine 100 weist im Inneren einen um eine
5 Rotationsachse 102 drehgelagerten Rotor 103 auf, der auch als Turbinenläufer bezeichnet wird.

Entlang des Rotors 103 folgen aufeinander ein Ansauggehäuse 104, ein Verdichter 105, eine beispielsweise torusartige Brennkammer 110, insbesondere Ringbrennkammer 106, mit
10 mehreren koaxial angeordneten Brennern 107, eine Turbine 108 und das Abgasgehäuse 109.

Die Ringbrennkammer 106 kommuniziert mit einem beispielsweise ringförmigen Heißgaskanal 111. Dort bilden beispielsweise vier hintereinandergeschaltete Turbinenstufen 112 die Turbine
15 108.

Jede Turbinenstufe 112 ist aus zwei Schaufelringen gebildet. In Strömungsrichtung eines Arbeitsmediums 113 gesehen folgt im Heißgaskanal 111 einer Leitschaufelreihe 115 eine aus Laufschaufeln 120 gebildete Reihe 125.

20 Die Leitschaufeln 130 sind dabei an einem Innengehäuse 138 eines Stators 143 befestigt, wohingegen die Laufschaufeln 120 einer Reihe 125 beispielsweise mittels einer Turbinenscheibe 133 am Rotor 103 angebracht sind. An dem Rotor 103
25 angekoppelt ist ein Generator oder eine Arbeitsmaschine (nicht dargestellt).

Während des Betriebes der Gasturbine 100 wird vom Verdichter 105 durch das Ansauggehäuse 104 Luft 135 angesaugt und
30 verdichtet. Die am turbinenseitigen Ende des Verdichters 105 bereitgestellte verdichtete Luft wird zu den Brennern 107 geführt und dort mit einem Brennmittel vermischt. Das Gemisch wird dann unter Bildung des Arbeitsmediums 113 in der Brennkammer 110 verbrannt.

35 Von dort aus strömt das Arbeitsmedium 113 entlang des Heißgaskanals 111 vorbei an den Leitschaufeln 130 und den Laufschaufeln 120. An den Laufschaufeln 120 entspannt sich

das Arbeitsmedium 113 impulsübertragend, so dass die Laufschaufeln 120 den Rotor 103 antreiben und dieser die an ihn angekoppelte Arbeitsmaschine.

- 5 Die dem heißen Arbeitsmedium 113 ausgesetzten Bauteile unterliegen während des Betriebes der Gasturbine 100 thermischen Belastungen. Die Leitschaufeln 130 und Laufschaufeln 120 der in Strömungsrichtung des Arbeitsmediums 113 gesehen ersten Turbinenstufe 112 werden neben den die
10 Ringbrennkammer 106 auskleidenden Hitzeschildsteinen am meisten thermisch belastet.
Um den dort herrschenden Temperaturen standzuhalten, werden diese mittels eines Kühlmittels gekühlt.
Ebenso können die Substrate eine gerichtete Struktur
15 aufweisen, d.h. sie sind einkristallin (SX-Struktur) oder weisen nur längsgerichtete Körner auf (DS-Struktur).
Als Material werden eisen-, nickel- oder kobaltbasierte Superlegierungen verwendet.
Beispielsweise werden Superlegierungen verwendet, wie sie aus
20 der EP 1204776, EP 1306454, EP 1319729, WO 99/67435 oder WO 00/44949 bekannt sind; diese Schriften sind Teil der Offenbarung.

- Ebenso können die Schaufeln 120, 130 Beschichtungen gegen
25 Korrosion (MCrAlX; M ist zumindest ein Element der Gruppe Eisen (Fe), Kobalt (Co), Nickel (Ni), X steht für Yttrium (Y) und/oder zumindest ein Element der Seltenen Erden) und Wärme durch eine Wärmedämmschicht aufweisen. Die Wärmedämmschicht besteht beispielsweise ZrO_2 , Y_2O_3 - ZrO_2 , d.h. sie ist nicht,
30 teilweise oder vollständig stabilisiert durch Yttriumoxid und/oder Kalziumoxid und/oder Magnesiumoxid.
Durch geeignete Beschichtungsverfahren wie z.B. Elektronenstrahlverdampfen (EB-PVD) werden stängelförmige Körner in der Wärmedämmschicht erzeugt.

- 35 Die Leitschaufel 130 weist einen dem Innengehäuse 138 der Turbine 108 zugewandten Leitschaufelfuß (hier nicht

dargestellt) und einen dem Leitschaufelfuß gegenüberliegenden Leitschaufelkopf auf. Der Leitschaufelkopf ist dem Rotor 103 zugewandt und an einem Befestigungsring 140 des Stators 143 festgelegt.

5

Figur 19 zeigt in perspektivischer Ansicht eine Schaufel 120, 130, die sich entlang einer Längsachse 121 erstreckt.

- 10 Die Schaufel 120 kann eine Laufschaufel 120 oder Leitschaufel 130 einer Strömungsmaschine sein. Die Strömungsmaschine kann eine Gasturbine eines Flugzeugs oder eines Kraftwerks zur Elektrizitätserzeugung, eine Dampfturbine oder ein Kompressor sein.

15

Die Schaufel 120, 130 weist entlang der Längsachse 121 aufeinander folgend einen Befestigungsbereich 400, eine daran angrenzende Schaufelplattform 403 sowie ein Schaufelblatt 406 auf.

- 20 Als Leitschaufel 130 kann die Schaufel an ihrer Schaufelspitze 415 eine weitere Plattform aufweisen (nicht dargestellt).

- Im Befestigungsbereich 400 ist ein Schaufelfuß 183 gebildet, 25 der zur Befestigung der Laufschaufeln 120, 130 an einer Welle oder einer Scheibe dient (nicht dargestellt).

Der Schaufelfuß 183 ist beispielsweise als Hammerkopf ausgestaltet. Andere Ausgestaltungen als Tannenbaum- oder Schwalbenschwanzfuß sind möglich.

- 30 Die Schaufel 120, 130 weist für ein Medium, das an dem Schaufelblatt 406 vorbeiströmt, eine Anströmkante 409 und eine Abströmkante 412 auf.

- Bei herkömmlichen Schaufeln 120, 130 werden in allen 35 Bereichen 400, 403, 406 der Schaufel 120, 130 beispielsweise massive metallische Werkstoffe verwendet.

Die Schaufel 120, 130 kann hierbei durch ein Gussverfahren, auch mittels gerichteter Erstarrung, durch ein Schmiedeverfahren, durch ein Fräsverfahren oder Kombinationen daraus gefertigt sein.

5

Werkstücke mit einkristalliner Struktur oder Strukturen werden als Bauteile für Maschinen eingesetzt, die im Betrieb hohen mechanischen, thermischen und/oder chemischen Belastungen ausgesetzt sind.

10 Die Fertigung von derartigen einkristallinen Werkstücken erfolgt z.B. durch gerichtetes Erstarren aus der Schmelze. Es handelt sich dabei um Gießverfahren, bei denen die flüssige metallische Legierung zur einkristallinen Struktur, d.h. zum einkristallinen Werkstück, oder gerichtet erstarrt.

15 Dabei werden dendritische Kristalle entlang dem Wärmefluss ausgerichtet und bilden entweder eine stängelkristalline Kornstruktur (kolumnar, d.h. Körner, die über die ganze Länge des Werkstückes verlaufen und hier, dem allgemeinen Sprachgebrauch nach, als gerichtet erstarrt bezeichnet werden) oder
20 eine einkristalline Struktur, d.h. das ganze Werkstück besteht aus einem einzigen Kristall. In diesen Verfahren muss man den Übergang zur globulitischen (polykristallinen) Erstarrung meiden, da sich durch ungerichtetes Wachstum notwendigerweise transversale und longitudinale Korngrenzen ausbilden, welche die guten Eigenschaften des gerichtet erstarrten
25 oder einkristallinen Bauteiles zunichte machen.

Ist allgemein von gerichtet erstarrten Gefügen die Rede, so sind damit sowohl Einkristalle gemeint, die keine Korngrenzen
30 oder höchstens Kleinwinkelkorngrenzen aufweisen, als auch Stängelkristallstrukturen, die wohl in longitudinaler Richtung verlaufende Korngrenzen, aber keine transversalen Korngrenzen aufweisen. Bei diesen zweitgenannten kristallinen Strukturen spricht man auch von gerichtet erstarrten Gefügen
35 (directionally solidified structures).

Solche Verfahren sind aus der US-PS 6,024,792 und der EP
0 892 090 A1 bekannt.

Wiederaufarbeitung (Refurbishment) bedeutet, dass Bauteile
5 120, 130 nach ihrem Einsatz gegebenenfalls von
Schutzschichten befreit werden müssen (z.B. durch
Sandstrahlen). Danach erfolgt eine Entfernung der Korrosions-
und/oder Oxidationsschichten bzw. -produkte. Gegebenenfalls
werden auch noch Risse im Bauteil 120, 130 repariert. Danach
10 erfolgt eine Wiederbeschichtung des Bauteils 120, 130 und ein
erneuter Einsatz des Bauteils 120, 130.

Die Schaufel 120, 130 kann hohl oder massiv ausgeführt sein.
15 Wenn die Schaufel 120, 130 gekühlt werden soll, ist sie hohl
und weist ggf. noch Filmkühlöffnungen (nicht dargestellt) auf.
Als Schutz gegen Korrosion weist die Schaufel 120, 130
beispielsweise entsprechende meistens metallische
Beschichtungen auf und als Schutz gegen Wärme meistens noch
20 eine keramische Beschichtung.

Die Figur 20 zeigt eine Brennkammer 110 einer Gasturbine.
Die Brennkammer 110 ist beispielsweise als so genannte
25 Ringbrennkammer ausgestaltet, bei der eine Vielzahl von in
Umfangsrichtung um die Turbinenwelle 103 herum angeordneten
Brennern 102 in einen gemeinsamen Brennkammerraum münden.
Dazu ist die Brennkammer 110 in ihrer Gesamtheit als
ringförmige Struktur ausgestaltet, die um die Turbinenwelle
30 103 herum positioniert ist.

Zur Erzielung eines vergleichsweise hohen Wirkungsgrades ist
die Brennkammer 110 für eine vergleichsweise hohe Temperatur
des Arbeitsmediums M von etwa 1000°C bis 1600°C ausgelegt. Um
35 auch bei diesen, für die Materialien ungünstigen Betriebs-
parametern eine vergleichsweise lange Betriebsdauer zu ermög-
lichen, ist die Brennkammerwand 153 auf ihrer dem Arbeitsme-

- dium M zugewandten Seite mit einer aus Hitzeschildelementen 155 gebildeten Innenauskleidung versehen. Jedes Hitzeschildelement 155 ist arbeitsmediumsseitig mit einer besonders hitzebeständigen Schutzschicht ausgestattet oder aus hochtemperaturbeständigem Material gefertigt. Aufgrund der hohen Temperaturen im Inneren der Brennkammer 110 ist zudem für die Hitzeschildelemente 155 bzw. für deren Halteelemente ein Kühlsystem vorgesehen.
- 10 Die Materialien der Brennkammerwand und deren Beschichtungen können ähnlich der Turbinenschaufeln sein.

- Die Brennkammer 110 ist insbesondere für eine Detektion von Verlusten der Hitzeschildelemente 155 ausgelegt. Dazu sind zwischen der Brennkammerwand 153 und den Hitzeschildelementen 155 eine Anzahl von Temperatursensoren 158 positioniert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erfassung von mikrostrukturellen
Veränderungen eines Bauteils (1),
5 insbesondere eines Schichtsystems (1),
durch zumindest zweimalige, insbesondere mehrmalige
Messung von zumindest einem Materialparameter des
Bauteils (1),
wobei eine Messmethode zur Bestimmung eines
10 Materialparameters, ausgewählt aus der Gruppe elektrische
Kapazität, thermische Leitfähigkeit, spezifische
Wärmekapazität, Peltierkoeffizient, magnetische
Suszeptibilität, Ferroelektrizität, Pyroelektrizität,
Ultraschall oder mechanischer Indentertest,
15 verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
20 die erste Messung des zumindest einen Materialparameters
an einem neu hergestellten Bauteil (1) durchgeführt wird.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
die erste Messung vor dem ersten Betriebseinsatz des
Bauteils durchgeführt wird.
30
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
35 die zumindest zweite Messung im zeitlichen Abstand von
der ersten Messung nach oder während des ersten
Betriebseinsatzes erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3 oder 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 5 das Verfahren eine zerstörungsfreie Messmethode
 beinhaltet.
- 10 6. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
- das Verfahren mit einem Schichtsystem (1) durchgeführt
 wird,
- 15 das aus einem Substrat (4) und zumindest einer Schicht
 (7, 10) besteht.
7. Verfahren nach Anspruch 1 oder 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 20 das Verfahren mit einem Schichtsystem (1) durchgeführt
 wird,
- das aus einem Substrat (4), zumindest einer ersten
- 25 Schicht (7) und einer äußeren Schicht (10) besteht.
8. Verfahren nach Anspruch 6 bis 7,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 30 mit dem Verfahren mikrostrukturelle Veränderungen in dem
 Substrat (4) und/oder der Schicht (7, 10) des Bauteils
 (1) untersucht werden,
 die durch Veränderungen von Ausscheidungen im Material
- 35 des Substrats (4) und/oder der zumindest einen Schicht
 (7, 10) bedingt sind.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 8,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 5 mit dem Verfahren mikrostrukturelle Veränderungen in dem Substrat (4) und /oder der Schicht (7, 10) des Bauteils (1) untersucht werden,
die durch Risse im Substrat (4) und/oder der zumindest
10 einen Schicht (7, 10) bedingt sind.
10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 9,
dadurch gekennzeichnet,
- 15 dass das Substrat (4) und/oder die Schicht (7, 10) eine Legierung ist, und
dass mit dem Verfahren mikrostrukturelle Veränderungen des Substrats (4) und/oder der Schicht (7, 10) untersucht
20 werden,
die durch Verarmung an zumindest einem Legierungselement bedingt sind.
- 25 11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 30 mit dem Verfahren mikrostrukturelle Veränderungen des Substrats (4) und/oder der zumindest einen Schicht (7, 10) untersucht werden,
insbesondere einer porösen keramischen Schicht (10),
die durch eine Versinterung des porösen Substrats (4) und/oder der Schicht (7,10) bedingt sind.
- 35

12. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis
11,
5 dadurch gekennzeichnet, dass
- mit dem Verfahren des Substrats (4) und/oder der
zumindest einen Schicht (7, 10) mikrostrukturelle
Veränderungen untersucht werden,
10 die durch eine Phasenveränderung des Materials des
Substrats (4) und/oder der zumindest einen Schicht (7,
10) bedingt sind.
- 15 13. Verfahren nach Anspruch 1 bis 12,
dadurch gekennzeichnet, dass
- die thermische Leitfähigkeit (λ) durch eine
Laserflashmethode oder durch eine Thermowellenanalyse
20 bestimmt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 1 bis 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
- 25 der Materialparameter des Substrats (4) bei vorhandener
Schicht (7, 10) auf dem Substrat (4) bestimmt wird.
- 30 15. Verfahren nach Anspruch 1 bis 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
- ein Materialparameter des Substrats (4) und der Schicht
(7, 10) zusammen bestimmt wird.
35

16. Verfahren nach Anspruch 1, 6, 7 oder 10,
dadurch gekennzeichnet, dass

5 das Verfahren mit einem Substrat (4) aus einer eisen-,
kobalt- oder nickel-basierten Superlegierung durchgeführt
wird.

17. Verfahren nach Anspruch 1, 6, 7 10 oder 12
dadurch gekennzeichnet, dass

10 das Verfahren mit einem Schichtsystem (1) durchgeführt
wird, wobei die Schicht (7) die Zusammensetzung MCrAlX-
Schicht aufweist,
wobei M für zumindest eine Element der Gruppe Eisen,
15 Kobalt oder Nickel steht,
sowie X für Yttrium, Silizium und/oder zumindest ein
Element der Seltenen Erden.

20 18. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass

das Verfahren mit einem Bauteil (1) einer Gas- (100) oder
Dampfturbine (300, 303),
25 insbesondere einer Turbinenschaufel (120, 130, 354, 357)
oder einer Auskleidung einer Brennkammer (110)
durchgeführt wird.

30 19. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass

die Messung der Materialparameter online erfolgt.

35

20. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass

5 ab einer bestimmten prozentualen Veränderung des
Materialparameters ein Zeitpunkt festgelegt wird,
ab dem das Bauteil (1) überprüft, wieder aufgearbeitet
werden oder komplett ausgetauscht werden muss.

10 21. Verfahren nach Anspruch 1 oder 18,
dadurch gekennzeichnet, dass

dass das Bauteil (1, 120, 130) ein Bauteil einer
Vorrichtung (100, 300, 303) ist, und
15 dass der Materialparameter gemessen wird während das
Bauteil (1, 120, 130) in der Vorrichtung (100, 300, 303)
eingebaut ist.

1 / 10

FIG 1

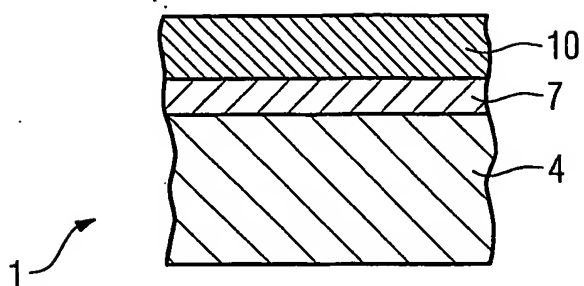


FIG 2

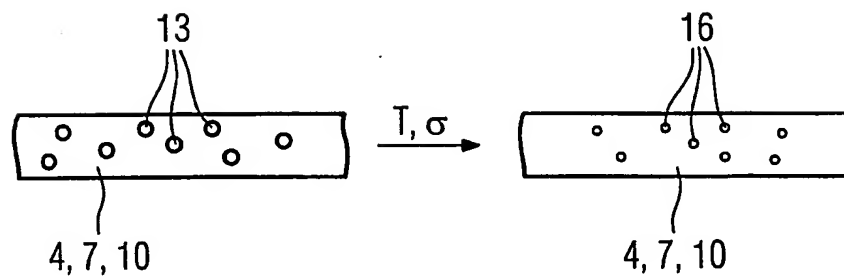
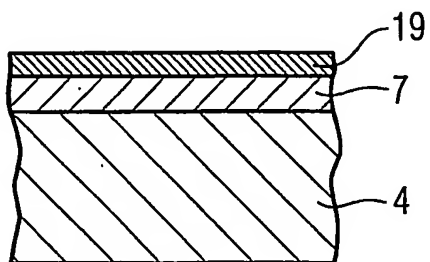


FIG 3



2/10

FIG 4

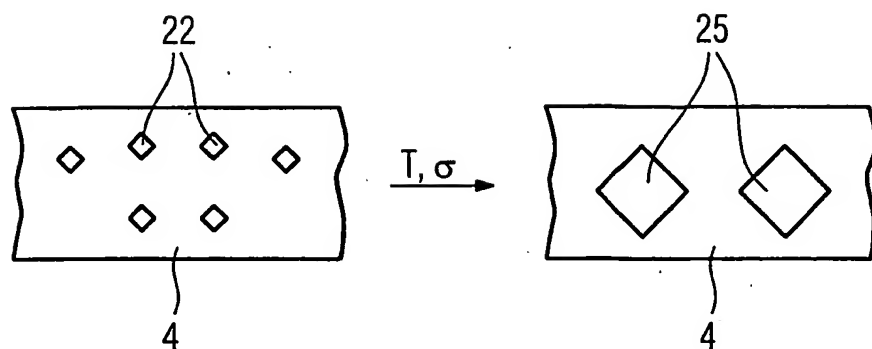


FIG 5

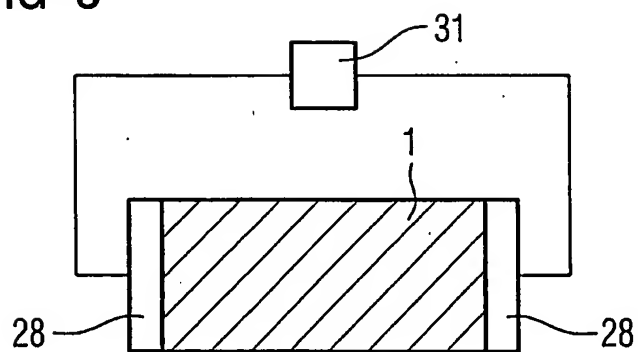
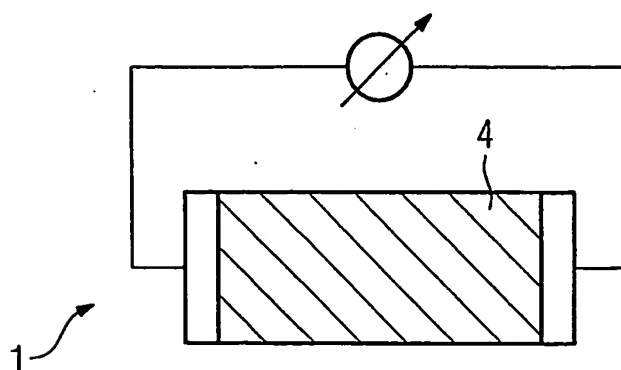


FIG 6



3 / 10

FIG 7

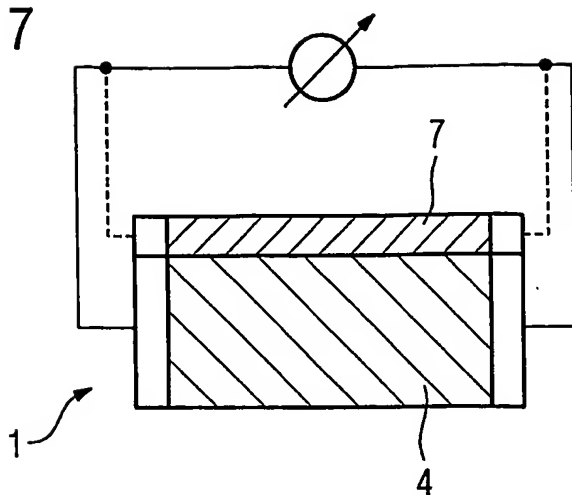


FIG 8

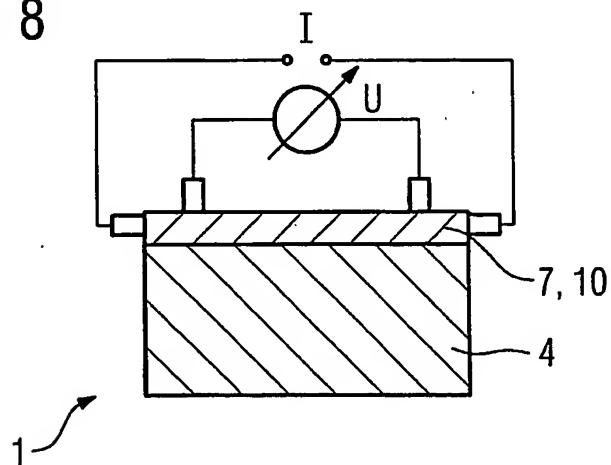
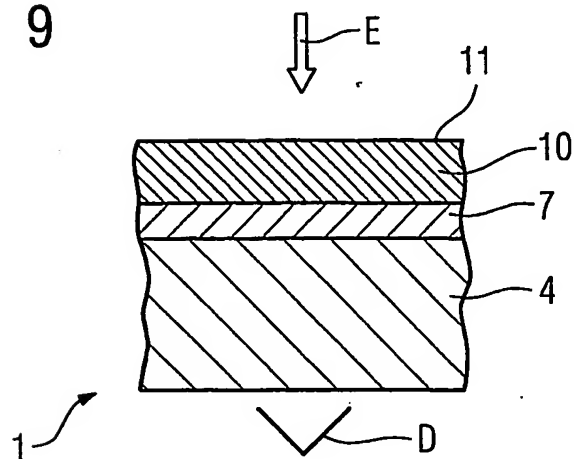


FIG 9



4 / 10

FIG 10

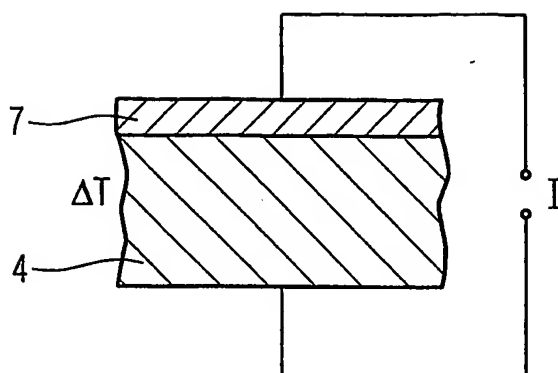


FIG 11

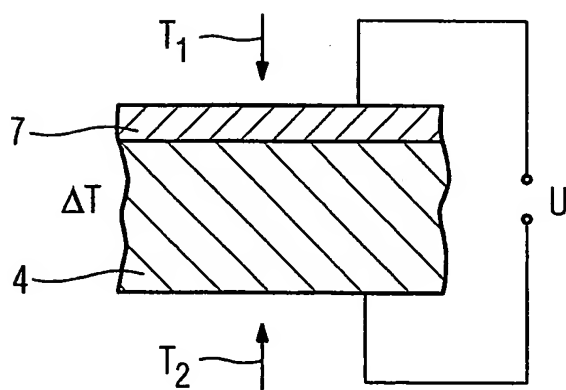


FIG 12

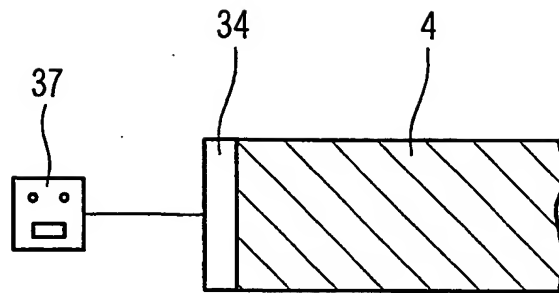
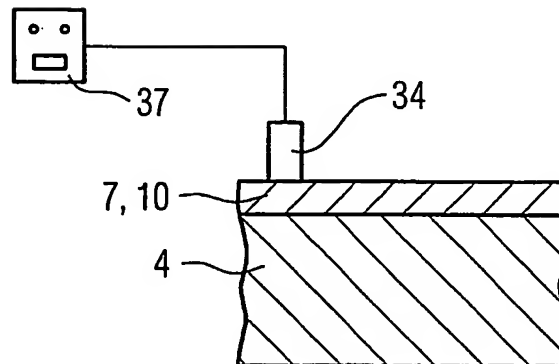


FIG 13



6/10

FIG 14

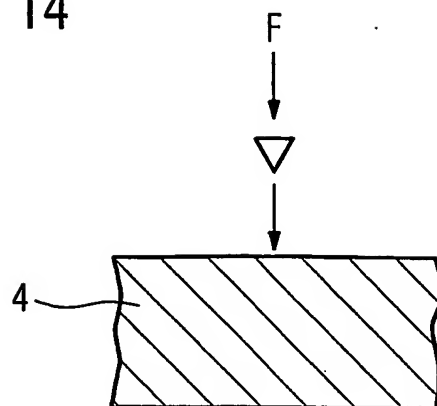


FIG 15

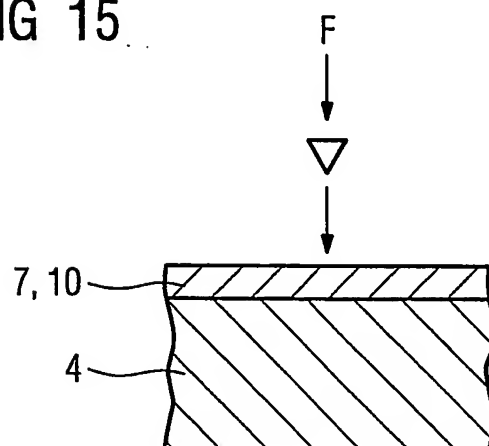
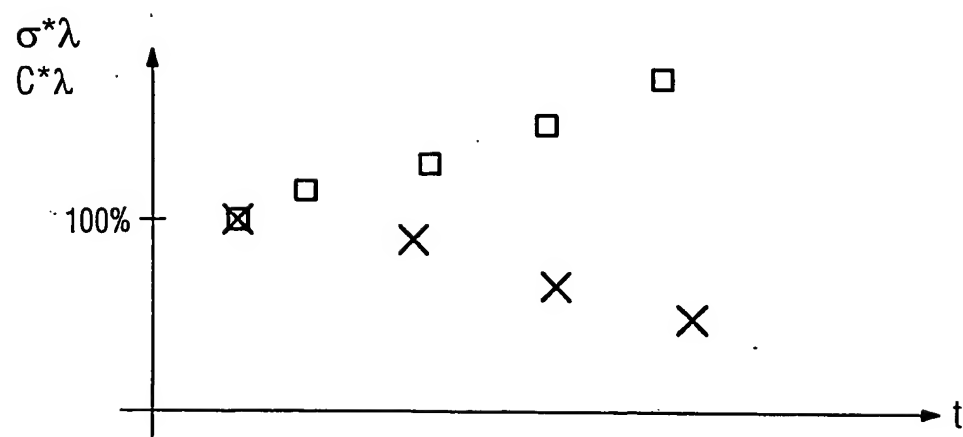


FIG 16



7/10

FIG 17

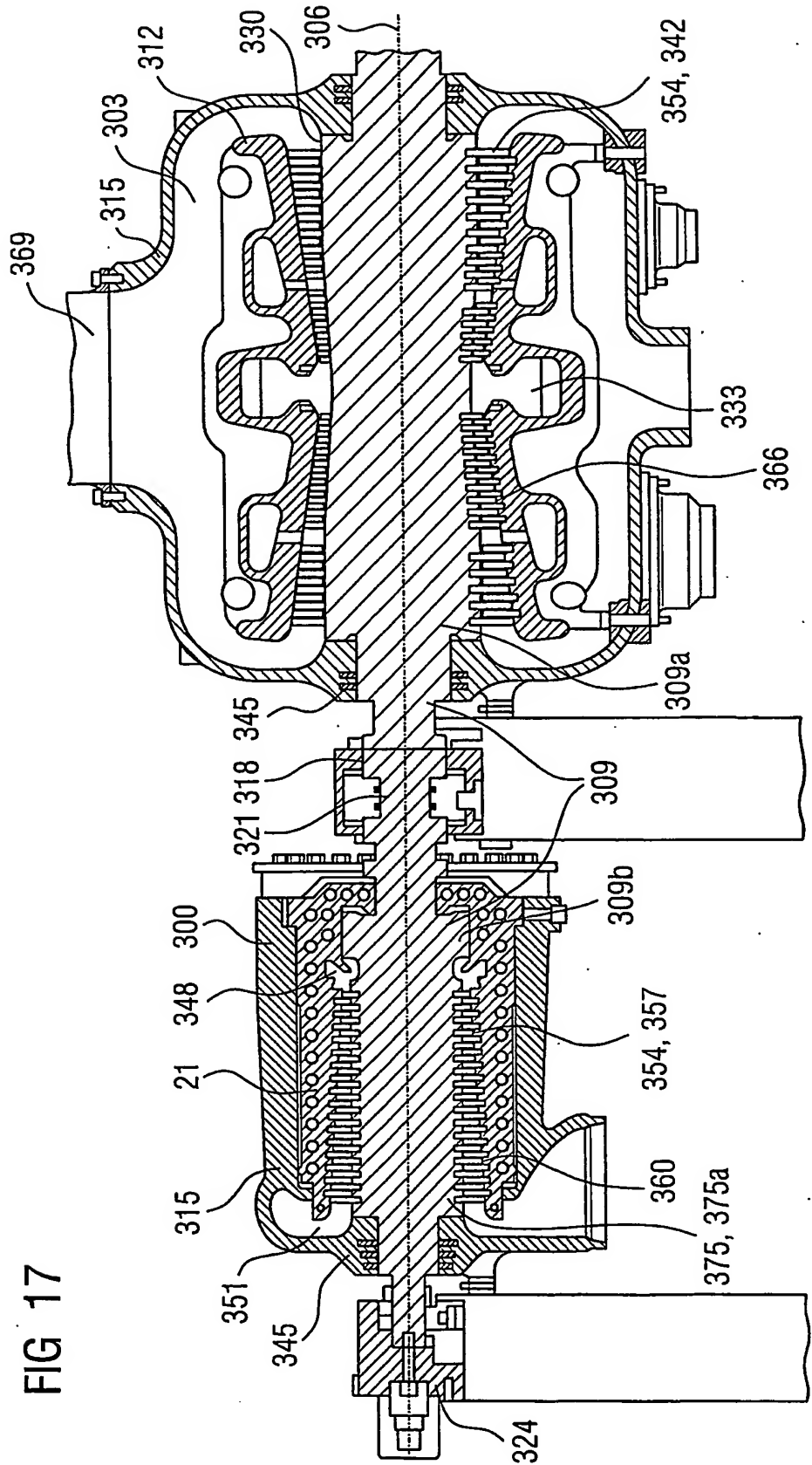


FIG 18

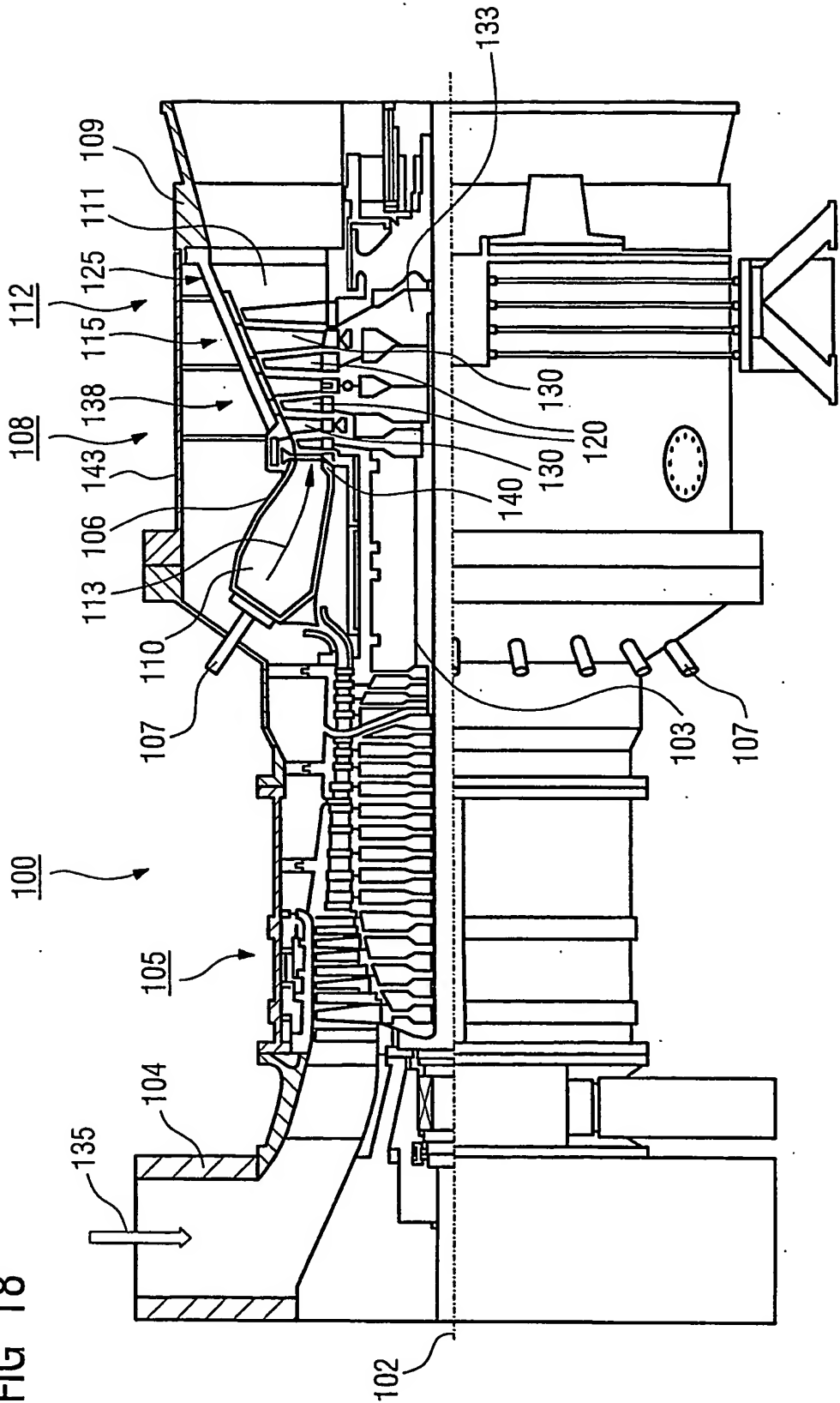


FIG 19

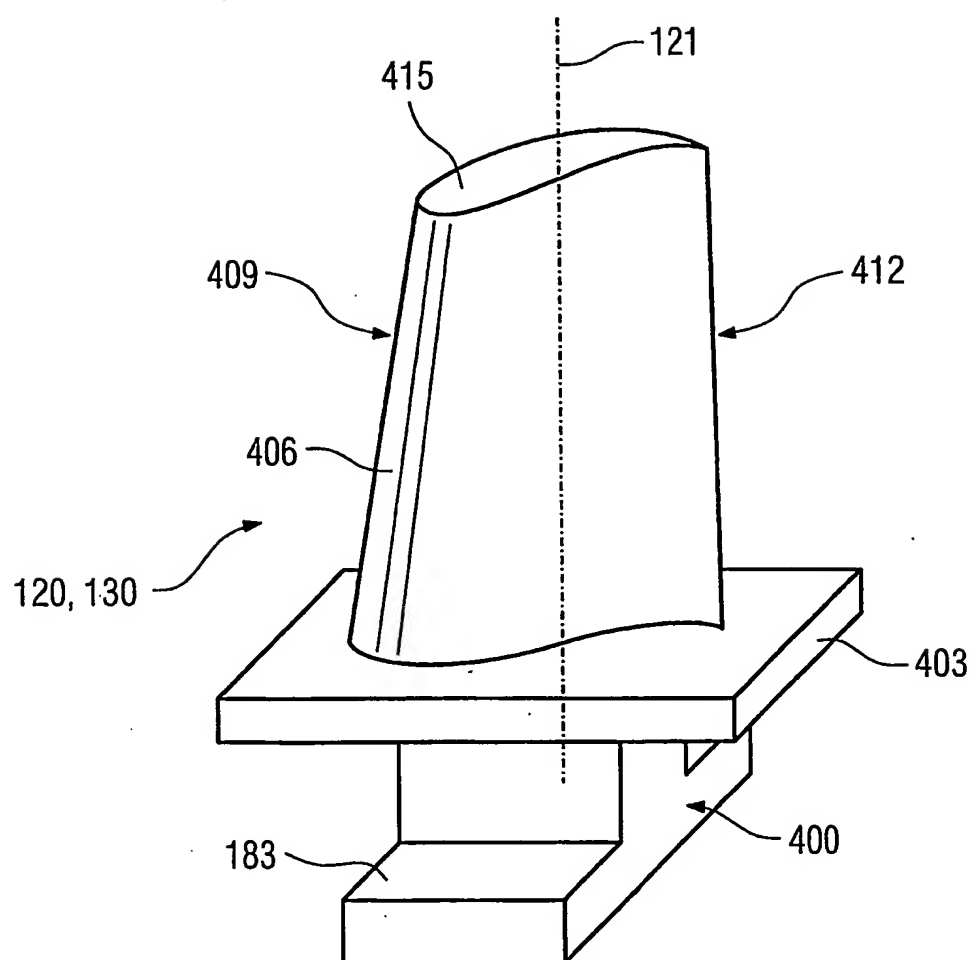


FIG 20

